

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.06.015

磨削加工质量与生产效率的综合优化研究*

赵 霞¹, 郭建亮², 迟 军², 陈廉清^{2*}
(1. 宁波职业技术学院 海天学院, 浙江 宁波 315800;
2. 宁波工程学院 机械工程学院, 浙江 宁波 315016)

摘要:针对目前存在的磨削优化研究成果偏重于加工质量,而无法兼顾加工效率的不足,对磨削加工质量与生产效率的综合优化策略进行了研究,对外圆磨削的主要目标及影响因素进行了归纳,以常规工艺参数及零件技术要求为约束条件,将外圆磨削表面粗糙度模型与材料去除率模型有机结合后形成综合目标函数,提出了外圆磨削加工的非线性优化模型。以正交设计法的磨削试验数据为基础,通过序列二次规划算法对模型加以训练,预测出最优磨削用量,在给定的磨削条件下,获得最优磨削用量为:磨削深度 $a_p=0.011$ mm,工件线速度 $v_w=30$ m/min,纵向进给量 $f=20$ mm/r。最后,通过随机选取的工艺参数对模型进行了试验验证,试验结果表明,模型最大预测误差不超过16%,预测结果可为实际工艺规程编制中选择最优工艺参数提供参考。

关键词: 磨削质量; 磨削效率; 优化

中图分类号: TH161; TG58 文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)06-0749-04

Optimization study by combining grinding quality and efficiency

ZHAO Xia¹, GUO Jian-liang², CHI Jun², CHEN Lian-qing²

(1. School of Haitian, Ningbo Polytechnic, Ningbo 315800, China;

2. School of Mechanical Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo 315016, China)

Abstract: Aiming at the shortcoming that grinding quality is emphasized much more than grinding efficiency in the literature, the combined optimization approach was studied in which both the machining quality and efficiency were considered. Through the analysis of the main objective and influencing factors for outer-diameter grinding operation, a nonlinear optimization model was proposed by combining the surface roughness model and the material removal rate model. The parameter region from design manual and the technical requirements on engineering drawings was incorporated into the model as several constraints. Based on the experimental data on orthogonal design of grinding experiments, the proposed model was trained by using the sequential quadratic programming algorithm. Under the given grinding condition in this work, the optimal parameters predicted by the model are a grinding depth of 0.011 mm, a workpiece velocity of 30 m/min, and a longitudinal feed rate of 20 mm/r. Finally, a series of verification experiments were carried out with random grinding parameter combinations. The results indicate that, the maximum prediction error is not over 16% and the predicted optimal parameters are helpful in programming the practical grinding process.

Key words: grinding quality; grinding efficiency; optimization

0 引 言

在实际生产中磨削工艺参数的选择主要依据操作人员的经验、感觉以及工艺手册所提供的数据,但

工人经验需经过大量实践加以积累,而手册中所规定的的数据仅仅是适用于多种加工场合的一个推荐范围,无法给出针对具体零件、具体设备的最合理的工艺参数取值。

收稿日期: 2014-01-22

基金项目: 浙江省教育厅科研资助项目(Y201224120);宁波市自然科学基金资助项目(2010A610131)

作者简介: 赵霞(1962-),女,浙江宁波人,主要从事机械工程方面的研究。E-mail:505925629@qq.com

通信联系人: 陈廉清,男,教授,硕士生导师。E-mail:nbclq@sina.com

为寻求最合理的工艺参数,国内外已有大量关于磨削加工过程优化方面的研究成果,研究对象包括常规磨削方法,也包括 ELID (Electrolytic In-process Dressing) 镜面磨削等先进磨削方法。池龙珠^[1]利用信噪比试验及回归设计法分析了砂轮转速、工件速度、径向进给量及砂轮粒度对表面粗糙度的影响规律,建立了表面粗糙度预测模型。王伟等^[2]针对机器人砂带磨削,提出了一种弧长优化算法,使得在磨削曲率较大的曲面时,磨削路径上的目标点较为致密,而磨削较平坦曲面时,磨削路径上的目标点较为稀疏。李国龙等^[3]提出了拓扑修形齿轮的成形磨轮廓形优化方法,使加工误差分布更均匀,精度高1~2级。吕长飞等^[4]利用小生境蚁群算法和小生境粒子群算法对磨削工艺进行优化,可在限定加工条件范围内选择最优的加工参数。曹德芳等^[5]开发出与磨削速度优化调节相对应的凸轮磨削自动数控程序编程功能模块,能把优化的速度数据直接导入数控程序以用于实际生产。孙林等^[6]通过建立表面粗糙度与磨削用量数据库及关系图,实现由果寻因的逆向追溯,对磨削用量优化、加工过程改进以及磨削质量提高均具有一定指导意义。刘林枝^[7]通过 SUS304 不锈钢 ELID 镜面磨削正交优化试验,研究磨粒大小、砂轮转速、平台速度、进给率及 ELID 电源等因素对不锈钢工件表面质量的影响,获得了合理的磨削工艺参数。崔仲鸣等^[8]通过实验对比的方式,研究了陶瓷空心球形复合超硬磨料磨削参数对磨削温度的影响及其规律,为其低温磨削特性及其应用提供了理论依据。陈勇等^[9]采用 BP 神经网络进行了磨削工艺参数智能优化系统设计,试验表明该系统的预测准确率超过 85%。郭二廓等^[10]基于提高成形磨削精度,同时考虑不产生磨削干涉,通过研究接触线的性质,调整砂轮安装角度,完成对成形磨削斜齿轮的接触线优化,进一步提高了齿向修形精度。

然而,将加工质量与加工效率综合效果加以考虑并针对外圆磨削的研究成果尚未见报道。对于外圆纵向磨削,加工质量的主要指标是工件表面粗糙度,加工效率可通过单位时间内去除的材料体积评价。为此,本研究从表面粗糙度模型和生产效率模型出发,构建总的目标函数,从而确定外圆纵向磨削的最优工艺参数组合。

1 表面粗糙度模型

由于磨削加工极其复杂,磨削加工表面粗糙度理论模型目前尚无法取得理想的预测精度,比较而言,经验模型则更加实用,最常用的经验模型采用如下形式^[11]:

$$R_a = C \frac{a_p^x v_w^y f^z}{v_c^b} \quad (1)$$

式中: R_a —衡量工件表面粗糙度的轮廓算术平均偏差; C —影响系数; x, y, z, b —磨削深度 a_p 、工件线速度 v_w 、纵向进给量 f 、砂轮线速度 v_c 的指数。

考虑到实际生产中砂轮线速度 v_c 通常保持不变,所以将 v_c^b 纳入到系数 C 中一并考虑,为简化表达,保持 C 的符号不变,修改后的表面粗糙度表达式为:

$$R_a = C a_p^x v_w^y f^z \quad (2)$$

式(2)的系数和指数取决于磨床性能、加工条件等多种复杂因素,磨削加工实践表明不存在广泛适用的统一取值,其大小需针对具体加工条件通过磨削试验数据进行训练来获取。在这样的多因素多水平试验中,如果对所有因素的多个水平进行全组合试验,将显著增加试验成本,降低该方法的可行性和经济性。而正交设计是多因素试验中一种最常用的方法,它可大幅减少试验次数。

正交设计的基本思想是从全组合试验中挑选出部分最具代表性的点,这些点具有“均匀”和“整齐”的特点。正交试验设计的主要工具是正交表,其格式为 $L_n(m^k)$, L 表示正交表, n 表示正交表行数,即试验次数, k 表示正交表的列数,包含 k 个试验因素, m 表示每个因素的水平数。

正交表有两条重要性质:

- (1) 每列中不同数字出现的次数相等;
- (2) 任意两列中,将同一行的两个数字看成有序数对时,各种数对出现的次数相等。因此按照正交表来安排磨削试验可保证每个因素每个水平的搭配都是均衡的。

磨削试验时共有磨削深度、工件线速度和纵向进给量 3 个因素,在精磨加工磨削用量范围内为 f 、 v_w 、 a_p 每个参数设定了 3 个水平,因此选择了 $L_9(3^3)$ 格式的正交表,试验设计方案及结果如表 1 所示。

表 1 磨削试验设计方案及试验结果

试验序号	a_p / mm	$v_w / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	$f / (\text{mm} \cdot \text{r}^{-1})$	$R_a / \mu\text{m}$
1	0.003	20	10	0.252
2	0.003	30	15	0.385
3	0.003	40	20	0.541
4	0.007	20	15	0.455
5	0.007	30	20	0.695
6	0.007	40	10	0.578
7	0.011	20	20	0.601
8	0.011	30	10	0.573
9	0.011	40	15	0.892

最后一列为试验结果(工件表面粗糙度 R_a)

本研究在经过改造的M1320外圆磨床上进行试验,其主运动和3个进给运动均可实现无级调速,因此可在一定范围内任意设定磨削用量,便于试验研究。砂轮型号为A60K8V刚玉砂轮,工件材料为45钢,按照先粗后精的加工原则,工件在磨削之前依次经过了粗加工、半精加工以及热处理等工序,磨削前工件尺寸为 $300 \times \phi 40$,采用纵磨法磨削工件,砂轮线速度保持35 m/s不变,砂轮修整工具为单颗金刚石修整笔,磨削后工件表面粗糙度采用TR200型粗糙度仪进行测量。

根据表1的数据确定式(2)中参数 C 、 x 、 y 、 z 的取值是建模的关键,基于总体预测误差最小化原则,可通过最小二乘法建立如下优化模型:

$$\min_{C,x,y,z} \sum_{i=1}^n (R_{ai} - Ca_{pi}^x v_{wi}^y f_i^z)^2 \quad (3)$$

式中: n —试验次数; a_{pi} 、 v_{wi} 、 f_i 、 v_{ci} 、 R_{ai} —第 i 次试验的磨削深度、工件线速度、纵向进给量、砂轮线速度及表面粗糙度。

式(3)以 C 、 x 、 y 、 z 为自变量求解预测误差平方和的最小值,该最小值所对应的参数值即为式(2)中 C 、 x 、 y 、 z 的取值。

本研究应用序列二次规划算法对模型式(3)进行求解,该方法是当今公认的处理中、小规模非线性规划问题最优秀的算法之一,其基本思路是将有约束的非线性优化问题转化为一组二次规划子问题进行求解,每次迭代求解一个子问题:

$$\begin{cases} \min_{d \in R^4} \frac{1}{2} d^T H_k d + \nabla f(x_k)^T d \\ \nabla g_i(x_k)^T d + g_i(x_k) = 0, i = 1, \dots, n_e \\ \nabla g_i(x_k)^T d + g_i(x_k) \leq 0, i = n_e + 1, \dots, n \end{cases} \quad (4)$$

式中: d —搜索方向,由于粗糙度经验模型中有4个未知参数,因此 $d \in R^4$; n_e —等式约束的个数; n —等式约束与不等式约束的总数; H_k —第 k 次迭代中拉格朗日构造函数的Hessian矩阵; $f(x_k)$ —第 k 次迭代对应的目标函数值; $\nabla g_i(x_k)$ —第 k 次迭代的第 i 个约束函数的梯度值。

Hessian矩阵通过拟牛顿法求得,首先任意给定Hessian矩阵的初值,然后在每次迭代中,用拟牛顿法提供的BFGS公式对Hessian矩阵进行估计并更新。具体优化过程是在某个近似解处将原非线性规划问题简化为一个二次规划问题,求取最优解,如果有则认为原问题的最优解;否则,用近似解构成新的二次规划问题,直至收敛。最终求出的表面粗糙度模型为:

$$R_a = 0.13a_p^{0.47} v_w^{0.71} f^{0.51} \quad (5)$$

2 综合优化模型

要建立综合优化模型,除了式(5)所示的磨削表面粗糙度模型以外,还需建立磨削加工效率模型。加工效率就是单位时间内切除多余材料的数量,故可用单位时间内去除材料的体积 V 作为衡量指标,根据磨削用量可得:

$$V = f \frac{v_w}{60 \times 1000 \pi d} \left(\frac{\pi d^2}{4} - \frac{\pi (d - 2a_p)^2}{4} \right) \quad (6)$$

表面粗糙度值一般越小越好,而单位时间内去除的材料越多越好,因此总的目标函数 t 采用分式结构,分母为 V ,分子为 R_a 。约束条件包括两方面:一方面要求表面粗糙度不超出临界值,该临界值需根据国家标准规定的优先数系并结合具体技术要求选取,如 $R_a \leq 0.8 \mu\text{m}$;另一方面需将磨削用量三要素 f 、 v_w 、 a_p 限定在工艺手册规定的范围内,本研究磨削条件对应的磨削用量范围为 $0.003 \text{ mm} \leq a_p \leq 0.011 \text{ mm}$, $20 \text{ m/min} \leq v_w \leq 40 \text{ m/min}$, $10 \text{ mm/r} \leq f \leq 20 \text{ mm/r}$,因此,综合优化模型为:

$$t = \frac{R_a}{V} = \frac{0.13a_p^{0.47} v_w^{0.71} f^{0.51}}{f \frac{v_w}{60 \times 1000 \times 40 \pi} \left(\frac{40^2 \pi}{4} - \frac{\pi (40 - 2a_p)^2}{4} \right)} \quad (7)$$

限制条件为:

$$\begin{cases} 0.13a_p^{0.47} v_w^{0.71} f^{0.51} \leq 0.8; \\ 0.003 \leq a_p \leq 0.011; \\ 20 \leq v_w \leq 40; \\ 10 \leq f \leq 20. \end{cases}$$

该模型的求解实际上是一个带非线性约束条件的目标函数最小化问题,同样可采用序列二次规划算法求得最优磨削用量,求出的最优值分别为 $a_p = 0.011 \text{ mm}$, $v_w = 30 \text{ m/min}$, $f = 20 \text{ mm/r}$,目标函数 $t = 7336$, $R_a = 0.800 \mu\text{m}$, $V = 1.09 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{s}$ 。这表明最优选择刚好满足了技术要求 $R_a \leq 0.8 \mu\text{m}$,同时获得了最大的加工效率,每秒钟可切除 $1.09 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$ 的多余材料。

3 试验验证及结果分析

为验证模型的预测精度,本研究进行了5次磨削试验,每次试验的磨削用量在精磨加工范围内随机选取,磨削用量及 R_a 、 V 、 t 的预测值如表2所示。由表2可知,若不考虑 R_a 临界值的限制,试验1综合效果最好,总目标 t 仅为7807;虽然工件表面最粗糙, R_a 为

表 2 磨削用量及目标函数的预测值

试验序号	$a_p / (\text{mm})$	$v_w / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	$f / (\text{mm} \cdot \text{r}^{-1})$	$R_a / (\mu\text{m})$	$V / (10^{-4} \text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	t
1	0.011	35	16	0.801	1.03	7 807
2	0.005	29	18	0.514	0.43	11 817
3	0.008	20	19	0.506	0.51	9 992
4	0.007	36	17	0.682	0.71	9 550
5	0.010	27	12	0.550	0.54	10 193

0.801 μm ; 但生产效率最高, 每秒能从工件表面切下 $1.03 \times 10^{-4} \text{mm}^3$ 多余的材料。试验 2 综合效果最差, 总目标 t 高达 11 817; 主要原因是加工效率太低, 每秒只能切掉 $0.43 \times 10^{-4} \text{mm}^3$ 的多余材料, 不足试验 1 的一半。

5 组试验的总目标函数 t 的测量值与预测值如图 1 所示, 由图可知试验 5 的测量值和预测值相差最大, 绝对误差约为 1 600, 相对误差接近 16%, 尚在可接受范围之内; 其余 4 组试验的相对误差较小。因此, 该模型所预测的最优磨削用量其置信度较高。

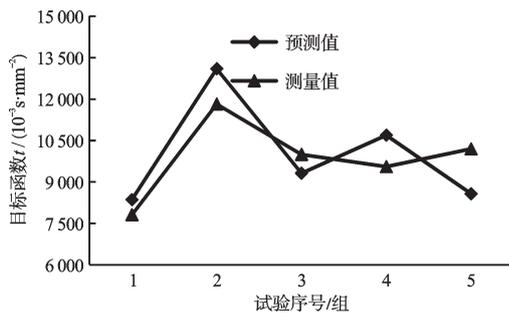


图 1 实测目标值与预测目标值的对比

4 结束语

(1) 本研究通过正交设计的外圆磨削试验数据, 建立了工件表面粗糙度的最小二乘法模型, 以剩余误差平方和最小化为目标确定了模型参数值。

(2) 本研究以常规的机械加工工艺参数及零件技术要求作为约束条件, 将外圆磨削表面粗糙度模型与材料去除率模型有机结合形成综合目标函数, 建立了外圆磨削加工的非线性优化模型。模型求解后得到本研究磨削条件下的最优磨削用量为磨削深度 $a_p = 0.011 \text{mm}$, 工件线速度 $v_w = 30 \text{m/min}$, 纵向进给量

$f = 20 \text{mm/r}$ 。

(3) 本研究通过随机选取的工艺参数对模型进行了试验验证, 其结果显示该模型的最大预测误差不超过 16%, 研究结果表明, 该模型预测所预测的最优磨削用量的置信度较高。

参考文献 (References):

- [1] 池龙珠. 磨削条件的优化及表面粗糙度的预测与控制[J]. 中国机械工程, 2011, 22(2): 158-161.
- [2] 王伟, 负超, 张令. 机器人砂带磨削的曲面路径优化算法[J]. 机械工程学报, 2011, 47(7): 8-15.
- [3] 李国龙, 李先广, 刘飞, 等. 拓扑修形齿轮附加径向运动成形磨削中的砂轮廓形优化方法[J]. 机械工程学报, 2011, 47(11): 155-162.
- [4] 吕长飞, 李郝林. 外圆磨削在线优化[J]. 制造技术与机床, 2012(2): 113-116.
- [5] 曹德芳, 邓朝晖, 刘伟, 等. 凸轮轴磨削加工速度优化调节与自动数控编程研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(18): 2149-2155.
- [6] 孙林, 杨世元. 基于最小二乘支持矢量机的成形磨削表面粗糙度预测及磨削用量优化设计[J]. 机械工程学报, 2009, 45(10): 254-260.
- [7] 刘林枝. SUS304 不锈钢 ELID 镜面磨削正交化实验研究[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(4): 506-509.
- [8] 崔仲鸣, 陈青秋, 韩亚光. 陶瓷空心球形复合超硬磨料低温磨削特性实验研究[J]. 机电工程, 2013, 30(12): 1477-1480.
- [9] 陈勇, 杨建国. 磨削工艺参数智能优化系统设计[J]. 东华大学学报: 自然科学版, 2013, 39(4): 417-431.
- [10] 郭二廓, 黄筱调, 袁鸿, 等. 基于提高成形磨削效率和精度的接触线优化[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(1): 67-74.
- [11] 哈尔滨工业大学, 上海工业大学. 机械制造工艺理论基础[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.

[编辑: 张翔]

本文引用格式:

赵霞, 郭建亮, 迟军, 等. 磨削加工质量与生产效率的综合优化研究[J]. 机电工程, 2014, 31(6): 749-752.

ZHAO Xia, GUO Jian-liang, CHI Jun, et al. Optimization study by combining grinding quality and efficiency[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(6): 749-752.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>